

## CORDEX-EA Phase 2 다중 지역기후모델을 이용한 한반도 미래 극한 기후 전망

김도현<sup>1)\*</sup> · 김진욱<sup>1)</sup> · 변영화<sup>1)</sup> · 김태준<sup>1)</sup> · 김진원<sup>1)</sup> · 김연희<sup>2)</sup> ·  
안중배<sup>3)</sup> · 차동현<sup>4)</sup> · 민승기<sup>5)</sup> · 장은철<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup>국립기상과학원 기후변화예측연구팀, <sup>2)</sup>국립기상과학원 미래기반연구부,  
<sup>3)</sup>부산대학교 대기환경과학과, <sup>4)</sup>울산과학기술원 도시환경공학과,  
<sup>5)</sup>포항공과대학교 환경공학부, <sup>6)</sup>공주대학교 대기과학과

(접수일: 2021년 9월 17일, 수정일: 2021년 11월 16일, 게재확정일: 2021년 12월 8일)

### Future Projection of Extreme Climate over the Korean Peninsula Using Multi-RCM in CORDEX-EA Phase 2 Project

Do-Hyun Kim<sup>1)\*</sup>, Jin-Uk Kim<sup>1)</sup>, Young-Hwa Byun<sup>1)</sup>, Tae-Jun Kim<sup>1)</sup>, Jin-Won Kim<sup>1)</sup>, Yeon-Hee Kim<sup>2)</sup>,  
Joong-Bae Ahn<sup>3)</sup>, Dong-Hyun Cha<sup>4)</sup>, Seung-Ki Min<sup>5)</sup>, and Eun-Chul Chang<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup>Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Korea

<sup>2)</sup>Innovative Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Korea

<sup>3)</sup>Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan, Korea

<sup>4)</sup>Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology,  
Ulsan, Korea

<sup>5)</sup>Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea

<sup>6)</sup>Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

(Manuscript received 17 September 2021; revised 16 November 2021; accepted 8 December 2021)

**Abstract** This study presents projections of future extreme climate over the Korean Peninsula (KP), using bias-corrected data from multiple regional climate model (RCM) simulations in CORDEX-EA Phase 2 project. In order to confirm difference according to degree of greenhouse gas (GHG) emission, high GHG path of SSP5-8.5 and low GHG path of SSP1-2.6 scenario are used. Under SSP5-8.5 scenario, mean temperature and precipitation over KP are projected to increase by 6.38°C and 20.56%, respectively, in 2081~2100 years compared to 1995~2014 years. Projected changes in extreme climate suggest that intensity indices of extreme temperatures would increase by 6.41°C to 8.18°C and precipitation by 24.75% to 33.74%, being bigger increase than their mean values. Both of frequency indices of the extreme climate and consecutive indices of extreme precipitation are also projected to increase. But the projected changes in extreme indices vary regionally. Under SSP1-2.6 scenario, the extreme climate indices would increase less than SSP5-8.5 scenario. In other words, temperature (precipitation) intensity indices would increase 2.63°C to 3.12°C (14.09% to 16.07%). And there is expected to be relationship between mean precipitation and warming, which mean precipitation would increase as warming with bigger relationship in northern KP (4.08% °C<sup>-1</sup>) than southern KP (3.53% °C<sup>-1</sup>) under SSP5-8.5 scenario. The projected relationship, however, is not significant for

\*Corresponding Author: Do-Hyun Kim, Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si 63568, Korea.  
Phone: +82-64-780-6642, Fax: +82-64-738-9072  
E-mail: dall201@korea.kr

extreme precipitation. It seems because of complex characteristics of extreme precipitation from summer monsoon and typhoon over KP.

**Key words:** Extreme climate, future projection, the Korean Peninsula, CORDEX-EA Phase 2, multi-RCM

## 1. 서 론

산업 혁명 이후 인간 활동으로 인한 온실가스의 꾸준한 증가로 최근에는 주요한 온실 가스 중 하나인 이산화탄소의 전 세계 평균 농도가 빠르게 상승해 410 ppm에 도달하였으며(IPCC, 2021), 이로 인해 전 지구적으로 기후변화가 빠르게 일어나고 있다. 2015~2019 전 지구 기후보고서(The Global Climate in 2015~2019)에 따르면, 2015~2019년의 5년 평균 기온이 산업화 이전(1850~1900년) 보다 1.1°C 상승하여 가장 더웠던 5년으로 확인되었다(WMO, 2019). 이러한 전 지구 기온 상승과 더불어 우리나라의 기후도 크게 변화한 것으로 관측되었다. 즉, 우리나라의 최근 30년(1981~2010년) 평균 기온은 20세기 초(1912~1940년)에 비해 1.6°C 상승하였고, 강수량은 큰 변동성을 가지며 135 mm 증가한 것으로 확인되었다(KMA, 2021). 이러한 현상들은 인간활동에 의해서 배출된 탄소와 관련 있으며, 전문가들은 인류가 기후위기에 봉착했다고 말하고 있다. 기후위기를 극복하기 위하여 전 세계적으로 탄소중립을 위한 계획을 수립하고 있으며, 우리나라도 2020년에 “2050 탄소중립”을 선언하고 추진전략을 발표하였다. 따라서 탄소중립을 달성하고 기후위기에서 벗어나기 위해서는 먼저 미래 기후변화를 정확하게 예측하는 것이 중요하며, 탄소배출 감축의 유무에 따라 기후변화가 얼마나 달라질 것인지 파악하는 것이 필요하다.

기후 전망에 범용적으로 사용되는 도구는 전 지구 모델(Global Climate Model; GCM)의 모의자료로, 세계 기후 연구 계획(World Climate Research Program; WCRP)이 주도하는 접합 모델 상호 비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project; CMIP) 하에서 많은 GCM의 모의 자료가 산출되었다(Taylor et al., 2012). 하지만 GCM의 수평해상도는 가장 최근 프로젝트인 CMIP6 하에서도 평균 100 km 이상으로(Eyring et al., 2016), 한반도의 복잡한 지형으로 인한 기후를 모의하기에는 부족하다. 따라서 한반도와 같은 좁은 지역의 복잡한 기후를 모의하기 위하여, 지역기후모델(Regional Climate Model; RCM)이 이용된다. RCM은 GCM 모의 자료에 상세한 지형, 지면 효과 등을 적용하는 역학적 상세화를 시행함으로써 모의자료를 산출한다. 따라서 RCM을 이용하면 GCM과 비교하여 높은 해상도와 지역 특성을 가진 모의 자료를 산출할 수 있으므로, 지역 기후 연구에 효과적이

다(Casanueva et al., 2016; Park et al., 2016; Kim et al., 2018b; Giorgi, 2019; Im et al., 2021).

표준화된 역학적 상세화와 자료 관리를 위하여, WCRP 산하에서 지역 기후 상세화 연합 실험(Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment; CORDEX) 프로젝트가 출범하였다(Giorgi and Gutowski, 2015). CORDEX 프로젝트는 전 세계의 여러 지역 그룹으로 나누어 실시되며, 동아시아에 대해서는 국립기상과학원의 주도하에 CORDEX-동아시아(EA) 프로젝트가 이루어지고 있다. CORDEX-EA의 Phase 1에서는 50 km의 수평해상도를 갖는 5종의 RCM (HadGEM3-RA, SNURCM, WRF, GRIMs, RegCM) 모의자료가 산출되었으며, 이를 이용하여 여러 연구에서 동아시아 및 한반도의 기후가 전망되었다(Ahn et al., 2016; Jin et al., 2016; Oh et al., 2016; Suh et al., 2016; Im et al., 2017; Kim et al., 2018a, 2020a; Park and Min, 2019).

최근에는 CMIP6의 실험체계 중 하나로써 CORDEX-EA Phase 2 프로젝트가 출범하였으며, 해당 프로젝트 하에서 국립기상과학원을 포함한 국내의 5개 연구기관이 RCM 5종(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, GRIMs, RegCM)의 모의자료를 산출하였다. CORDEX-EA Phase 2 하에서는 Phase 1에 비해 수평 해상도가 25 km로 더 상세한 모의자료가 산출되었으며, CMIP6의 새로운 미래 온실가스 시나리오인 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways; SSP) 시나리오 하에서 적분이 시행되었다(Riahi et al., 2017). 따라서 CORDEX-EA Phase 2 모의자료를 통하여 더 상세하고 최신 온실가스 경로 하에서의 기후 전망이 가능하므로, 본 연구에서는 CORDEX-EA Phase 2 모의 자료를 이용하여 한반도 미래 기후 전망을 제시하고자 한다.

2장에서는 본 연구에서 사용한 자료에 대한 설명과 미래 전망을 위한 구체적인 방법론을 제시하였다. 3장에서는 모의 자료의 현재 기후 모의 능력을 검증한 후에 해당 모의 자료를 이용하여 한반도의 미래 기후를 전망하였다. 마지막 장에서는 본 연구를 요약하고 결론을 제시하였다.

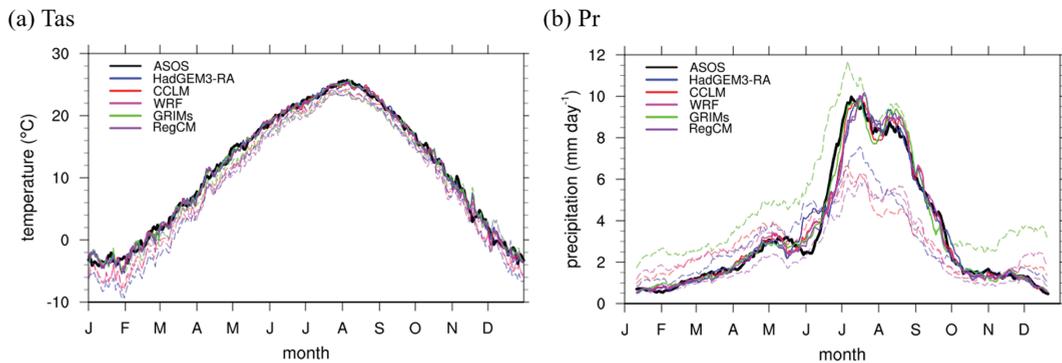
## 2. 자료 및 연구 방법

### 2.1 자료

기후 모델의 전망에는 불확실성이 포함되어 있으며,

**Table 1.** Configurations of Regional Climate Models (RCM) used in this study.

	HadGEM3-RA	CCLM	WRF	GRIMs	RegCM
Vertical layers	63 eta levels	40 hybrid	27 sigma	28 sigma	23 sigma
Land surface model	MOSES II	TERRA-ML	NOAH	NOAH	CLM3.5
Convection scheme	Revised mass flux	Tiedtke	Kain-Fritsch II	SAS + CMT	MIT-Emmanuel
Spectral nudging	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Simulation period	Historical experiment: 1979~2014 SSP5-8.5 scenario: 2015~2100 SSP1-2.6 scenario: 2015~2100				
Reference	Davies et al. (2005)	Rockel et al. (2008)	Powers et al. (2017)	Hong et al. (2013)	Giorgi et al. (2012)



**Fig. 1.** Daily climatology for (a) temperature and (b) precipitation during present (1995~2014 years). Observed data from ASOS is indicated by black solid line and bias corrected simulation data from RCM are indicated by other colors solid lines. The bias uncorrected simulation data are indicated by dashed lines. The climatology for precipitation is running averaged using 21 days.

특히 RCM은 자체의 불확실성 뿐만 아니라 경계 자료인 GCM의 불확실성에도 영향을 받을 수 있다(Kim et al., 2020b; Park et al., 2016). 따라서 본 연구에서는 RCM의 불확실성을 최소화하며 동아시아의 미래 기후를 전망하기 위해, RCM 5종(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, GRIMs, RegCM)의 모의 자료를 평균하여 분석에 이용하였다(Multi Model Ensemble; MME). GCM인 UKESM (UK Earth System Model)의 6시간 간격, 37층(1~1000 hPa)의 모의자료를 경계장으로 사용하여 적분을 실시하였으며(Sellar et al., 2019), 각 RCM에 대한 정보는 Table 1에 상세히 기술되어 있다. RCM의 적분은 동아시아 전반을 포함하는 CORDEX-EA Phase 2 영역에 대해서 이루어졌다(Lee et al., 2020; Fig. 1 참조).

가장 먼저, RCM의 적분은 과거 기후 모의 실험(Historical)에 대해서 이루어졌다. 이 때 Historical 실험 자료의 적분은 1979년부터 2014년까지 수행되었으며, 해당 자료는 RCM 모의 자료의 성능 검증 및

미래 전망과의 비교에 사용되었다. 다음으로, RCM의 적분은 SSP 시나리오에 대해서 이루어졌다. 미래 기후를 전망하기 위해 사용된 SSP 시나리오는 기후변화 적응 및 완화에 따라 여러 시나리오로 구성되며, 본 연구의 RCM은 SSP1-2.6(이하 SSP1) 및 SSP5-8.5(이하 SSP5) 시나리오 조건 하에서 2015년부터 2100년에 대해 적분을 수행하였다. SSP1은 기후변화에 대한 적응능력이 뛰어난과 동시에 친환경 기술의 발달로 완화 능력도 높은 지속성장 경로를 대표하는 저농도 온실가스 시나리오이며, SSP5는 기후변화에 대한 적응 능력은 뛰어나지만 화석 연료의 의존으로 완화 능력이 낮은 고속성장 경로를 대표하는 고농도 온실가스 시나리오이다. 즉, 두 시나리오 하의 모의자료를 사용함으로써 온실가스 배출 농도에 따른 기후변화를 살펴보고자 하였다.

마지막으로, 본 연구에서는 평균 기후(Mean climate)의 전망을 위하여 월 평균 기온(Tas) 및 강수량(Pr) 기후 변수를 사용하였다. 이와 함께, 극한 기후(Extreme

climate)는 월 시간 규모에 비해 더 상세한 일 시간 규모에서 발생하고, 특정 변수의 최고 값 및 최저 값과 관련되어 있으므로, 일 최고기온(Tasmax), 일 최저기온(Tasmin)과 일 강수량의 기후 변수를 사용하였다.

## 2.2 연구 방법

한반도의 미래 기후 전망을 위하여, 다음과 같은 네 가지의 분석 기간을 설정하였다: 현재 기간(1995~2014년), 미래 전반기(2021~2040년), 중반기(2041~2060년), 후반기(2081~2100년). 이 때, 현재 기간에 대해서는 Historical 실험, 미래 전반기, 중반기, 후반기에 대해서는 SSP1 및 SSP5 시나리오의 모의 자료를 사용하였다.

본 연구에서는 극한 기후의 변화를 정량화 하기 위하여, ETCCDI (Expert Team of Climate Change Detection and Indices)에서 정의하였거나(Zhang et al., 2011), 이를 참고하여 만든 극한기후지수를 이용하였다. 해당 지수의 계산에는 일 최고기온, 일 최저기온과 일 강수량이 이용되므로, 연간 및 월간 자료 기반의 분석

에 비하여 더 상세한 극한 기후 정보를 제공한다. ETCCDI 극한기후지수는 관측 자료(Donat et al., 2013) 및 모델 모의 자료(Orlowsky and Seneviratne, 2012; Sillmann et al., 2013; Kim et al., 2018a) 바탕의 연구에서 사용되어 극한 기후의 특성을 충분히 나타낸 바 있으며, 지수들의 자세한 사항은 Table 2와 Table 3에 기술되어 있다.

RCM 모의자료의 불확실성을 줄이기 위하여 본 연구에서는 MME 분석 뿐만 아니라 편차 보정(Bias correction) 작업도 실시하였다. 모의 자료의 편차 보정에는 Linear scaling, Local intensity scaling, Power transformation, Variance scaling, Quantile Mapping 등의 방법을 이용할 수 있다(Teutschbein and Seibert, 2012). 본 연구에서는 기온에 대하여, 기온 월분포의 평균 뿐만 아니라 분산까지 보정해주는 Variance Scaling (VS) (Chen et al., 2011) 보정 기법을 사용하였다. 강수에 대해서는, 기온에 적용된 VS 보정 기법과 비슷하나 멱함수(power function)를 이용하여 강수 분포의 비선형성이 반영된 Power Transformation (PT) (Leander

**Table 2.** Specifications of extreme climate indices calculated using daily minimum temperature (TN) and maximum temperature (TX). The percentile for historical experiment is based on present (1995~2014 years).

Label	Index Name	Index Definition	Units
TNn	Min TN	The minimum TN in each year	°C
TXn	Min TX	The minimum TX in each year	°C
TNx	Max TN	The maximum TN in each year	°C
TXx	Max TX	The maximum TX in each year	°C
FD	Frost days	The days TN is lower than 0°C in each year	days
ID	Ice days	The days TX is lower than 0°C in each year	days
TR	Tropical days	The days TN is higher than 25°C in each year	days
HW	Heatwave days	The days TX is higher than 33°C in each year	days
TN10p	Cold nights	The days TN is lower than 10th percentile of TN for historical experiment in each year	days
TX10p	Cold days	The days TX is lower than 10th percentile of TX for historical experiment in each year	days
TN90p	Warm nights	The days TN is higher than 90th percentile of TN for historical experiment in each year	days
TX90p	Warm days	The days TX is higher than 90th percentile of TX for historical experiment in each year	days

**Table 3.** Same as Table 2 except for daily precipitation (PR).

Label	Index Name	Index Definition	Units
RX1day	Max 1day PR	The maximum PR in each year	mm
RX5day	Max 5day PR	The maximum 5 day PR in each year	mm
R80mm	Heavy rain days	The days PR is higher than 80 mm in each year	days
R150mm	Extremely heavy rain days	The days PR is higher than 150 mm in each year	days
R95p	Very wet days	The wet (PR ≥ 1 mm) days PR is higher than 95th percentile of PR for historical experiment in each year	days
R99p	Extremely wet days	The wet (PR ≥ 1 mm) days PR is higher than 99th percentile of PR for historical experiment in each year	days
CWD	Consecutive wet days	The maximum consecutive wet (PR ≥ 1 mm) days in each year	days
CDD	Consecutive dry days	The maximum consecutive dry (PR < 1 mm) days in each year	days

et al., 2008) 보정 기법을 이용하였다. 보정 기법에 대한 자세한 사항은 부록에 기술되어 있다.

한편, 모델 모의자료의 편차 보정을 위하여 남한 및 북한을 포함한 한반도 72개 Automated Synoptic Observing System (ASOS) 지점 관측 자료를 사용하였으며, 사용 기간은 현재 기간인 1995~2014년과 동일하다. 또한 모델 격자와 ASOS 지점의 위치가 서로 다르므로, 모델 자료를 선형 보간(linear interpolation) 작업을 통하여 ASOS 각 지점의 위치와 맞는 모델 값을 산출하였다. 즉, 선형 보간된 72개 격자의 모델 자료를 편차 보정을 실시한 뒤 분석에 사용하였다.

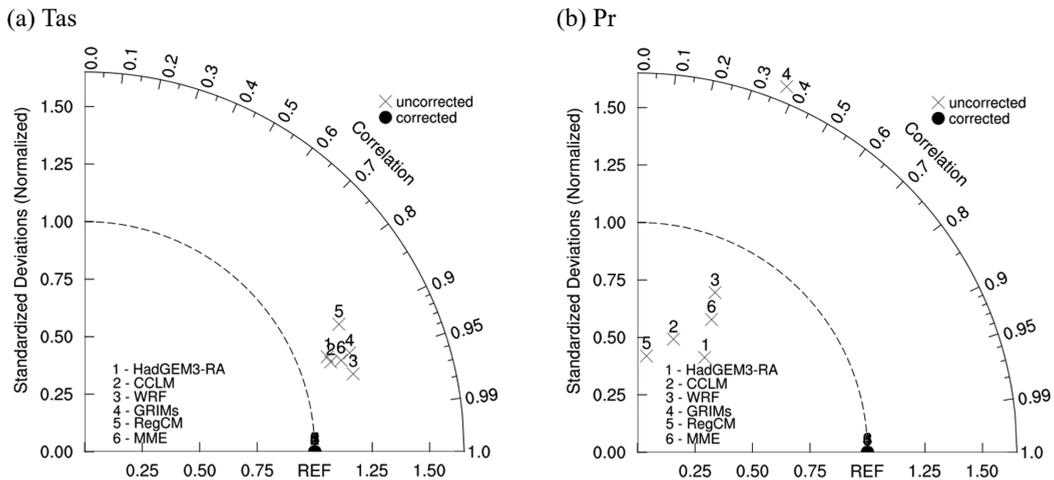
### 3. 연구 결과

#### 3.1 현재 기후 모의

본 절에서는 지역기후모델의 모의자료가 편차 보정을 통하여 한반도의 기온 및 강수 특성을 잘 반영하였는지 확인하였다. 시간적 특성에 대해서는 각 기후 요소의 일 평년값(Fig. 1), 공간적 특성에 대해서는 테일러 선도(Taylor diagram) (Fig. 2)를 이용하였다. ASOS 관측 자료의 연중 기온 분포는 겨울철에 가장 낮고 여름철에 가장 높은 분포를 나타내고 있다(Fig. 1a). 이러한 시간 분포를 모든 지역기후모델은 잘 모의하고 있으나, 모든 계절에서 관측자료보다 기온을 낮게 모의하고 있는 음의 편차가 발생하였다(-1.59°C). 편차 보정 후에는 VS 편차 보정 기법이 ASOS 관측 자료와 기온 규모를 근접하게 보정하여 모델 모의자료의 음의 편차를 해소한 것을 확인할 수 있다. 한편,

극한 기후 분석에 사용될 일 최저기온 및 최고기온 모의자료에 대해서도 편차 보정이 진행되었으며, ASOS 관측 자료와 동일하게 보정되었음을 확인하였다(not shown). 다음으로, 강수에 대하여 ASOS 관측 자료 하에서는 여름철에 최대 강수 및 겨울철에 최소 강수를 기록하는 특성을 가지는 가운데, 여름철에 강수량의 최대치가 두 번 기록되는 쌍봉우리(Bimodal) 강수 분포를 나타내고 있다(Fig. 1b). 편차 보정 전의 모델 모의자료에 대하여 7~10월에 GRIMs를 제외한 모델들은 관측보다 강수를 낮게 모의하는 건조 편차를(-1.67 mm day<sup>-1</sup>), 그 외의 월에는 습윤 편차를 나타내고 있다(0.68 mm day<sup>-1</sup>). 또한 HadGEM3-RA와 같은 일부 모델들은 쌍봉우리 강수 분포를 모의하지 못하는 편차를 확인할 수 있다. 편차 보정 후에는 PT 편차 보정 기법이 모델 모의자료의 강수 규모를 관측자료에 근접하게 보정하여 건조 및 습윤 편차를 해소한 것이 확인되었다. 또한, 해당 기법을 통하여 모델이 여름철 쌍봉우리 강수 분포를 제대로 재현하지 못하던 문제를 잘 보정한 것을 확인할 수 있다.

Figure 2는 ASOS 관측 자료를 기준으로 한 공간 상관 계수 및 표준화된 표준편차를 표출하는 테일러 선도이다. 기온에 대하여(Fig. 2a), 편차 보정을 적용하기 전 모델 모의 자료의 공간 상관계수가 0.94 (0.89~0.96), 표준화된 공간 표준편차는 1.18 (1.13~1.24)으로 나타나 ASOS와 비교하여 공간 분포에 약간의 편차가 발생함을 확인하였다. 편차 보정 후에는 공간 상관계수 및 표준화된 표준편차가 1에 근접해져 앞선 공간 편차가 해소된 것으로 나타났다. 한편, 강수에



**Fig. 2.** Taylor diagram of (a) temperature and (b) precipitation. The diagram indicates spatial correlation and normalized standard deviations of RCM simulations in based on ASOS observation. And bias uncorrected and corrected RCM simulations are marked as cross and dot, respectively. The data are for historical experiment during present. The closer spatial statistics of the simulation data are to that of the observation data, the closer crosses and dots to a 'REF' point in x-axis.

대해서는(Fig. 2b), 편차 보정을 적용하기 전 공간 상관관계수가 0.49(0.09~0.58), 표준화된 표준편차가 0.66(0.42~1.72)로 공간 분포에 큰 편차가 있으며, 모델 간의 공간 모의 차이도 크게 나타남을 확인하였다. 강수 역시 편차 보정 후에 공간 상관관계수 및 표준화된 표준편차가 1에 근접해져 앞선 공간 편차가 해소된 것으로 나타났다.

즉, 기온에 대해서는 VS 기법, 강수에 대해서는 PT 기법을 사용하여 모델 모의자료의 편차 보정을 진행하였으며, 편차 보정 후의 모의자료가 관측 자료의 시간 및 공간적 특성을 잘 반영함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 현재 기간에서 나타난 모델 모의 자료의 편차가 미래 기간에도 동일하게 발생한다고 가정하고, 산출된 보정 계수를 미래 시나리오 모의 자료에 사용하였다.

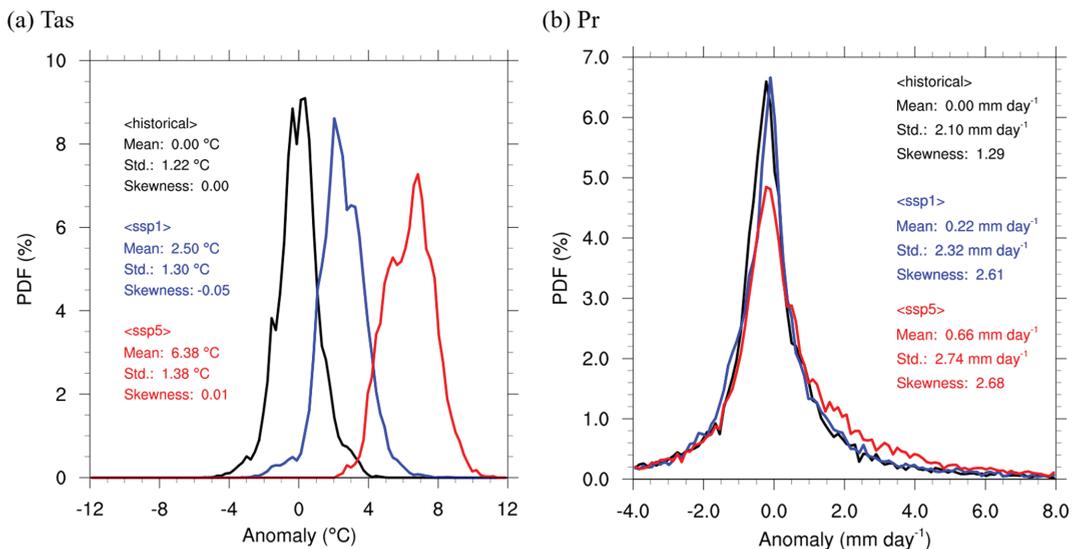
### 3.2 평균 기후 전망

극한 기후의 전망을 살펴보기 전, 확률밀도함수를 이용하여 온실가스 시나리오에 따른 한반도 평균 기후의 변화를 살펴보았다. 확률밀도함수 분석을 통하여 각 기후 요소 분포의 특성을 나타내는 평균(Mean), 표준 편차(Standard deviation; Std.) 및 비대칭도(Skewness)를 제시하였다. 이는 평균의 변화뿐만 아니라 표준 편차 및 비대칭도의 변화를 통하여 퍼짐 정도, 치우침 정도 및 극한값의 정성적인 빈도 등 분포의 여러 특성을 파악하는데 유용하다.

평균 기후의 변화를 살펴보기 위한 확률밀도함수는

Fig. 3에 제시되어 있으며, 현재 기간의 Historical 실험 및 미래 후반기의 SSP5와 SSP1 시나리오 하에서의 분포가 계산되었다. 또한 해당 분포의 계산에는 각 기후 요소의 격자별 월 아노말리가 사용되었다. 가장 먼저 평균 기온에 대하여(Fig. 3a), 현재 기간 아노말리 분포의 표준편차는 1.22°C, 비대칭도는 0으로 확인되었으며, 미래 후반기 SSP5 시나리오 하에서는 아노말리 분포의 평균이 6.38°C 증가할 것으로 전망되었다. 즉, 현재 기간에는 기온의 아노말리가 -4°C에서 4°C에 주로 분포하고 있었으나, 고농도 온실가스로 인하여 현재 기간에 나타나지 않던 4°C 이상의 극한 아노말리의 빈도가 크게 증가할 것으로 확인되었다. 이와 함께, 아노말리 분포의 표준편차가 0.16°C(13.11%) 증가할 것으로 전망되었다. 분포의 동일한 평균을 가정했을 때, 표준편차의 증가는 그렇지 않은 경우보다 극한 현상이 더 자주 나타나게 되는 결과를 초래하게 된다. 따라서 분포의 표준편차 증가는 고농도 온실가스 하에서 극한 기온의 빈도가 더 크게 증가하는데 기여할 것으로 볼 수 있다. 한편, 아노말리 분포의 비대칭도는 0.01 증가하여 그 변화가 크지 않을 것으로 전망되었다.

SSP1에 대해서 살펴보면, 미래 후반기 SSP1 하에서의 아노말리 분포의 평균은 2.5°C, 표준편차는 1.3°C, 비대칭도는 -0.05로 확인되었다. 즉, 평균이 2.5°C 증가하고, 표준편차는 0.08°C(6.56%) 증가하여 그 변화가 SSP5에 비해 작을 것으로 전망되었다. 이에 따라, 저농도 온실가스 하에서는 고농도 온실가스 하에서



**Fig. 3.** Probability density functions of anomalies for monthly mean (a) temperature and (b) precipitation from bias corrected 72 grid points. They are for historical experiment (black) during present and SSP1-2.6 (blue) and SSP5-8.5 scenario (red) during late future, respectively (2081~2100 years).

나타났던  $-4^{\circ}\text{C}$ 에서  $4^{\circ}\text{C}$  아노말리 빈도의 감소가 크게 억제될 것으로 확인되었다. 한편, 아노말리 분포의 비대칭도는 0.05 감소하여 그 변화가 크지 않을 것으로 전망되었다.

다음으로 평균 강수에 대하여(Fig. 3b), 현재 기간 아노말리 분포의 표준 편차는  $2.1\text{ mm day}^{-1}$ , 비대칭도는 1.29로 분포가 좌측으로 치우쳐져 있는 것으로 확인되었다. 미래 후반기 SSP5 시나리오 하에서는 아노말리 분포의 평균이  $0.66\text{ mm day}^{-1}$  증가할 것으로 전망되었다. 현재 기간의 평균 강수 절대값이  $3.21\text{ mm day}^{-1}$  이므로,  $0.66\text{ mm day}^{-1}$ 의 증가는 고농도 온실가스 하에서 평균 강수가 20.56% 증가할 것임을 시사한다. 이와 함께, 현재 기간에 비해 표준편차와 비대칭도가 각각  $0.64\text{ mm day}^{-1}$  (30.48%), 1.39 증가할 것으로 확인되었다. 앞서 언급했듯이, 표준편차의 변

화는 극한값 빈도 변화와 관련성이 크다. 따라서 고농도 온실가스 하에서, 평균 변화와 함께 표준편차가 증가하는 것은 극한 강수의 빈도 증가에 기여할 것임을 의미한다. 이는  $1\text{ mm day}^{-1}$  (약  $30\text{ mm month}^{-1}$ ) 이상의 극한 강수 아노말리의 빈도가 높게 나타날 것으로 전망되는 모습에서도 확인할 수 있다.

한편, 미래 후반기 SSP1 하에서는 강수 아노말리 분포의 평균이  $0.22\text{ mm day}^{-1}$ , 표준편차는  $2.32\text{ mm day}^{-1}$ , 비대칭도는 2.61이 전망되었다. 즉, 평균이  $0.22\text{ mm day}^{-1}$  (6.9%) 증가하고, 표준편차는  $0.22\text{ mm day}^{-1}$  (10.48%) 증가하여 그 변화가 SSP5에 비해 작을 것으로 전망되었다. 이는 온실가스 저감이 강수 분포의 평균뿐만 아니라 퍼짐 정도의 변화도 억제시킬 것임을 의미한다. 하지만, 비대칭도가 SSP5와 비슷한 정도인 1.32 증가하여 온실가스 저감이 분포의 치우침

**Table 4.** Simulated Extreme climate indices for temperature from MME of 5 RCM over the Korean Peninsula. The value in bracket is anomaly under SSP5-8.5 and SSP1-2.6 scenario based on Historical experiment of present. Significance level of the anomaly is tested by Student-t test and shown next to the simulated indices as asterisk, \*\*\*: 1% \*\*: 5% and \*: 10%.

Index	Present (1995~2014 years)	Early future (2021~2040 years)		Mid future (2041~2060 years)		Late future (2081~2100 years)	
		SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
TNn ( $^{\circ}\text{C}$ )	-15.42	-13.27*** (2.15)	-12.55*** (2.87)	-13.48*** (1.94)	-11.40*** (4.02)	-12.30*** (3.12)	-7.24*** (8.18)
TNx ( $^{\circ}\text{C}$ )	24.73	26.76*** (2.03)	27.00*** (2.27)	27.20*** (2.47)	28.17*** (3.44)	27.36*** (2.63)	31.14*** (6.41)
TXx ( $^{\circ}\text{C}$ )	35.60	37.62*** (2.02)	37.87*** (2.27)	38.34*** (2.74)	39.29*** (3.69)	38.38*** (2.78)	43.67*** (8.07)
TXn ( $^{\circ}\text{C}$ )	-6.02	-4.09*** (1.93)	-3.16*** (2.86)	-4.09*** (1.93)	-2.30*** (3.72)	-3.16*** (2.86)	2.04*** (8.06)
FD (days)	113.36	97.22*** (-16.14)	93.18*** (-20.18)	98.19*** (-15.17)	79.59*** (-33.77)	87.40*** (-25.96)	52.32*** (-61.04)
ID (days)	23.48	15.88*** (-7.60)	13.09*** (-10.39)	16.83*** (-6.65)	10.57*** (-12.91)	13.01*** (-10.47)	3.98*** (-19.50)
TR (days)	3.37	17.84*** (14.47)	20.98*** (17.61)	22.77*** (19.40)	34.01*** (30.64)	24.14*** (20.77)	68.45*** (65.08)
HW (days)	7.96	19.43*** (11.47)	21.09*** (13.13)	24.21*** (16.25)	36.17*** (28.21)	28.38*** (20.42)	85.00*** (77.04)
TN10p (days)	36.5	22.93*** (-13.57)	17.08*** (-19.42)	22.86*** (-13.64)	11.53*** (-24.97)	16.35*** (-20.15)	0.88*** (-35.62)
TX10p (days)	36.5	24.52*** (-11.98)	18.76*** (-17.74)	25.37*** (-11.16)	14.43*** (-22.07)	18.96*** (-17.54)	1.98*** (-34.52)
TN90p (days)	36.5	62.09*** (25.59)	66.73*** (30.23)	69.18*** (32.68)	80.50*** (44.00)	73.05*** (36.55)	112.95*** (76.45)
TX90p (days)	36.5	62.78*** (26.28)	65.67*** (29.17)	70.49*** (33.99)	87.27*** (50.77)	79.65*** (43.15)	137.91*** (101.41)

정도의 변화를 억제시키는 데에는 효과가 크지 않을 것으로 확인되었다.

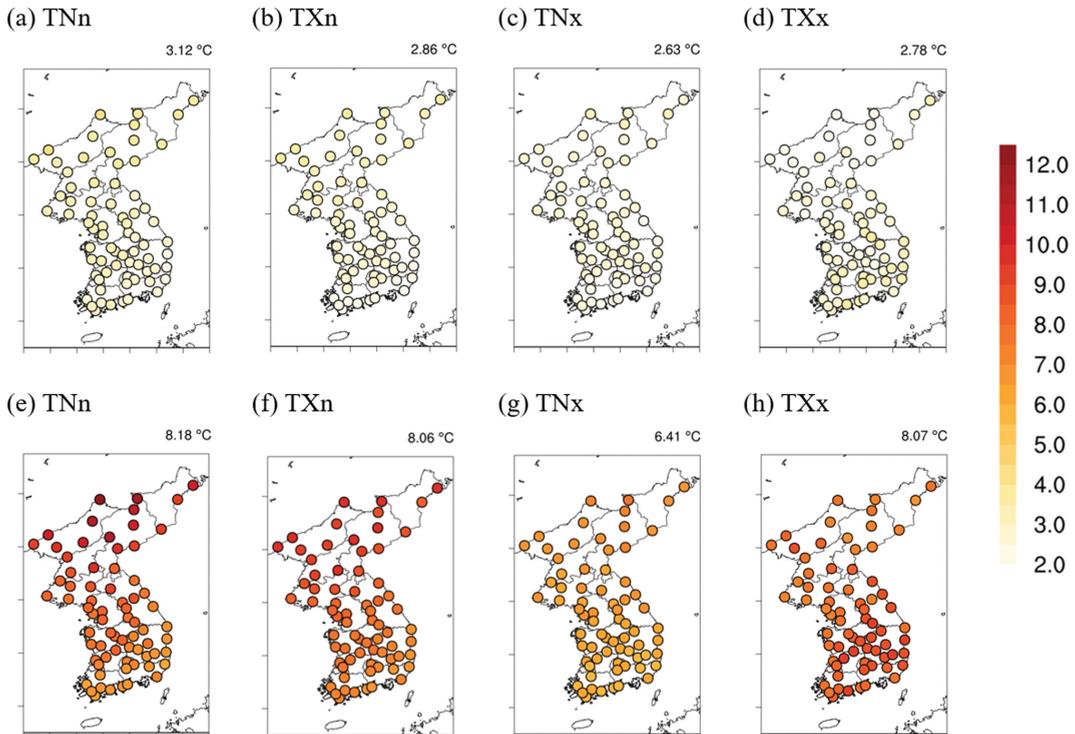
### 3.3 극한 기후 전망

#### 3.3.1 극한 기온

Table 4은 기온 극한 기후를 나타내는 극한기후지수 12종의 현재 기간 및 미래 기간의 모의 값을 나타내고 있다. RCM 5종의 MME 값과 함께, 현재 기간에 대한 미래 기간 동안의 편차 및 편차의 통계적 유의성도 제시되어 있다. 가장 먼저, 극한 기온의 강도를 나타내는 일 최저기온 및 최고기온의 연중 최소값, 최고 값(TNn, TNx, TXn, TXx) 모두 SSP5 시나리오 하에서 현재 기간보다 증가할 것으로 전망되었다. 이때, 극한 기온의 강도 지수는 미래 후반기에 현재 기간에 비하여 6.41~8.18°C 더 상승할 것으로 나타나 동일 조건의 평균 기온 상승 전망치(6.38°C) 보다 클 것으로 전망되었다. 한편, 일 최저 기온의 연중 최고 값(TNx)이 타 극한 기온의 강도 지수(TNn, TXn, TXx)에 비해 동일 조건에서 비교적 작게 상승할 것으로 확인되었다.

다음으로, 겨울철 극한 저온 현상의 빈도를 나타내는 서리 일수와 결빙 일수(FD, ID)의 경우 SSP5의 미래 후반기에 61.04일, 19.5일 감소할 것으로 전망되었다. 반면, 여름철 극한 고온 현상의 빈도를 나타내는 열대야 일수와 폭염 일수(TR, HW)는 SSP5의 미래 후반기에 각각 65.08일, 77.04일 증가할 것으로 전망되었다. 이는 현재 기간에 비해 서리 일수와 결빙 일수가 각각 53.85%, 83.05% 감소하여 겨울철 극한 기온의 빈도가 크게 줄어드는 동시에, 열대야 일수와 폭염 일수가 각각 19.31배, 9.68배 증가하여 여름철 극한 기온의 빈도 지수는 크게 증가할 것임을 의미한다.

특정 임계값이 아닌 지점별 퍼센타일(10th, 90th)을 임계 값으로 이용한 분석에서도 극한 기온의 빈도 지수가 크게 증가하는 결과가 전망되었다. 즉, SSP5의 미래 후반기에 한랭야 및 한랭일(TN10p, TX10p)은 각각 35.62일, 34.52일 감소하고 온난야 및 온난일(TN90p, TX90p)은 각각 76.45일, 101.41일 증가할 것으로 나타났다. 이는 현재 기간에 비해 겨울철 극한 기온의 빈도 지수가 거의 0일에 가깝도록 감소하고 여름철 극한 기온의 빈도 지수는 각각 3.09배, 3.78배



**Fig. 4.** Geographical distributions for anomalies of extreme temperature indices of TNn, TXn, TNx and TXx from simulation of MME. The anomalies are from two scenarios of SSP1 (upper panel) and SSP5 (lower panel) during late future. And they are based on Historical experiments of present. The change spatially averaged for a corresponding variable is located at upper right in each plot. The grid where statistical significance by student-t test is over 95% is indicated by black outlined circle.

증가함을 의미한다.

한편, 저농도 온실가스 시나리오 하에서는 고농도 온실가스 시나리오에 비해 미래 전기간에서 극한 기온의 변화가 비교적 억제될 것으로 전망되었다. 즉, 현재 기간에 비해 미래 후반기에 극한 기온의 강도 지수가 2.63~3.12°C 상승하는 데 그칠 것으로 나타났다. 또한 겨울철 극한 저온 현상의 빈도 지수인 서리 일수, 결빙 일수, 한랭야 및 한랭일은 각각 25.96일, 10.47일, 20.15일, 17.54일 감소하고 여름철 극한 고온 현상의 빈도 지수인 열대야 일수, 폭염 일수, 온난야 및 온난일은 20.77일, 20.42일, 36.55일, 43.15일 증가할 것으로 나타나 극한 기온의 빈도 변화도 억제될 것으로 전망되었다. 이는 온실가스 배출 저감이 극한 기온의 강도 및 빈도 지수의 증가를 억제하는 데에도 효과가 있음을 시사한다. 마지막으로, 두 시나리오 간의 온실가스 배출량 차이가 가장 큰 미래 후반기에 극한 기온 반응의 차이가 가장 커질 것으로 나타났으며, 반응의 통계적 유의성은 두 시나리오 및 모든 미래 기간, 극한 기온 요소에 대해 99% 수준에서 유의할 것으로 전망되었다(Table 4).

극한 기온 반응의 공간 특성을 확인하기 위한 극한 기온의 편차 공간 분포가 Fig. 4와 Fig. 5에 제시되어 있다. 공간 분포는 미래 후반기의 SSP5 및 SSP1 시

나리오에 대해서 나타나 있으며, 극한 기온 강도(TNn, TNx, TXn, TXx; Fig. 4) 및 지점별 퍼센타일을 이용하여 산출된 빈도(TN10p, TX10p, TN90p, TX90p; Fig. 5) 지수에 대하여 제시되었다. 이 때, 온실가스 변화의 영향으로 기후요소가 통계적으로 유의하게 변화한 지점은 검은색 원 테두리로 표시하였다. 가장 먼저 미래 후반기 SSP5 시나리오 하에서 제시되었던 극한 기온 강도 지수의 큰 상승은 한반도 전역에서 나타날 것으로 전망되었다(Figs. 4e-h). 하지만 극한 기온 강도 지수의 종류에 따른 지역 편차가 확인되었다. 즉, 타 지역에 비하여 일 최저 및 최고기온의 연중 최고값은 한반도 북부 지역에서 더 큰 증가가, 일 최고기온의 연중 최고값은 한반도 남부 내륙에서 약간 더 큰 증가가 전망되었다. 한편, 일 최저기온의 연중 최고값은 한반도 전역에서 비슷하게 증가할 것으로 전망되었다.

다음으로, 지점별 퍼센타일을 이용하여 산출된 극한 기온 빈도 지수의 변화 분포를 살펴보았다. 한랭야 및 한랭일은 한반도 전역에서 0일에 가깝게 감소될 것으로 확인되었으며, 온난야 및 온난일은 한반도 전역에서 현재 기간에 비해 2배 이상 증가할 것으로 전망되었다(Figs. 5e-h). 즉, 해당 극한 기온 빈도 지수의 반응에는 지역 편차가 작을 것으로 확인되었다.

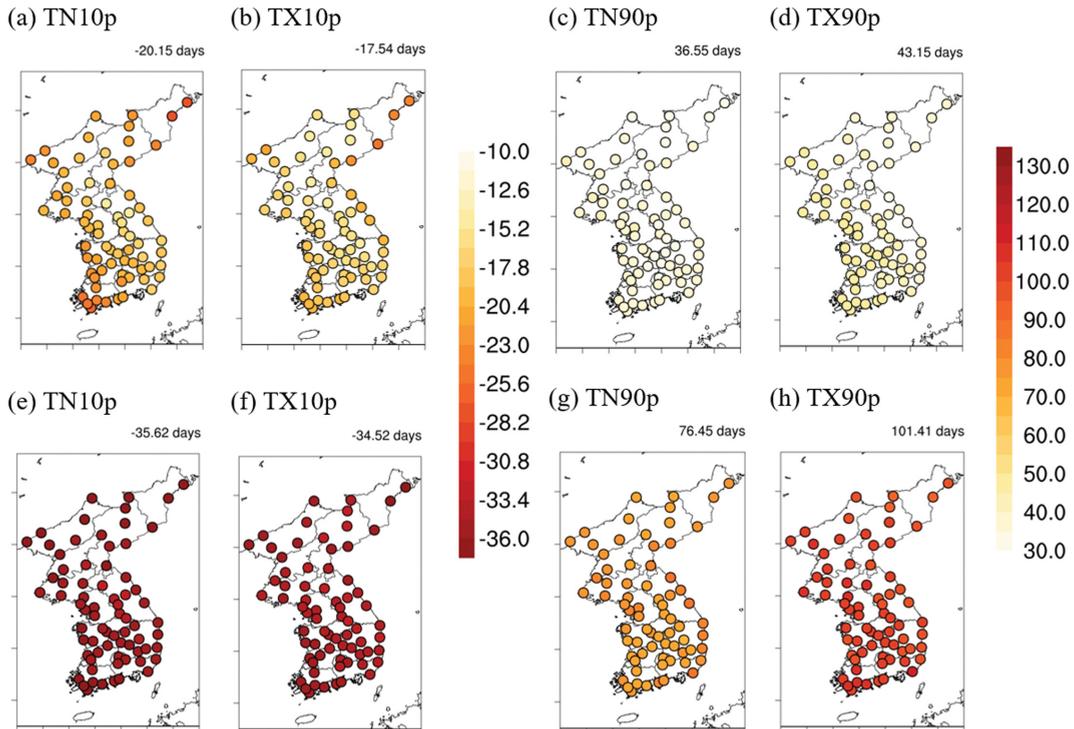


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for extreme temperature indices of TN10, TX10p, TN90p and TX90p.

고농도 온실가스 시나리오와 비교하여, 저농도 온실가스 시나리오 하에서는 한반도 전역에서 극한 기온 강도(Figs. 4a-d) 및 극한 기온 빈도(Figs. 5a-d) 지수의 변화가 억제될 것으로 전망되었다. 이와 함께, 고농도 온실가스에서 나타났던 극한 기온 강도(Fig. 4) 지수의 지역 편차도 줄어들 것으로 확인되었다. 하지만, 저온 극한 기온 빈도(Figs. 5a, b) 지수에 대해서는 온실가스 저감 효과가 타 지역에 비해 해안 지역에서 약하게 나타나는 지역 편차가 전망되었다.

### 3.3.2 극한 강수

Table 5은 SSP5 및 SSP1 시나리오 하에서 극한 강수 지수의 시간에 따른 모의 값을 나타내고 있다. 가장 먼저 미래 후반기의 SSP5 시나리오 하에서 연중 최대 1일 강수량(RX1day)은 46.56 mm, 5일 최대 강수량(RX5day)은 57.57 mm 증가할 것으로 전망되었다. 이는 현재 기간에 비해 RX1day는 33.74%, RX5day는 24.75% 증가한 것이며, 평균 강수(20.56%)보다 더 큰 증가 전망치이다.

극한 강수의 강도 지수뿐만 아니라 빈도 지수도 미래 고농도 온실가스 하에서 크게 증가할 것임이 확인되었다. 즉, 연중 강수량 80 mm 및 150 mm 초과 일수(R80mm, R150mm)는 현재 기간에는 각각 2.04일, 0.48일이었으나, 미래 후반기 SSP5 시나리오 하에서 각각 0.84일(41.12%), 0.39일(80.16%) 증가하여 강수

강도가 강해질수록 빈도 변화가 커질 것으로 전망되었다. 또한 특정 임계 값이 아닌 지점별 퍼센타일을 이용하였을 때에도 극한 강수 빈도 지수가 크게 증가할 것으로 확인되었다. 즉, 연중 강수량 95 및 99 퍼센타일 초과 일수(R95p, R99p)는 현재 기간에 각각 3.97일, 0.83일이었으나, 미래 후반기 SSP5 시나리오 하에서 각각 1.36일(34.3%), 0.48일(57.55%) 증가하여 이 역시 강수의 강도가 강해질수록 빈도 변화가 증가할 것으로 전망되었다.

또한 온난화 환경은 극한 강수의 연속일 지수에도 영향을 줄 것으로 확인되었다. 연중 최대 연속 습윤 일수(CWD)는 미래 후반기 SSP5 시나리오 하에서 1.39일(15.8%) 증가할 것으로 전망되었으며, 연속 습윤 일수와 반대의 성질을 나타내는 연중 최대 연속 건조 일수(CDD)도 동일 환경에서 3.84일(12.14%) 증가할 것으로 확인되었다.

한편, 미래 후반기 SSP1 시나리오 하에서는 극한 강수의 강도, 빈도 및 연속일 지수의 변화가 SSP5 시나리오에 비해 억제될 것으로 전망되었다. 즉, 연중 최대 1일 및 5일 강수량은 각각 16.07%, 14.09%, 연중 강수량 80 mm 및 150 mm 초과 일수는 각각 15.2%, 33.47%, 연중 강수량 95 및 99 퍼센타일 초과 일수는 각각 12.99%, 24.73%, 연중 최대 연속 습윤 및 건조 일수는 각각 9.9%, 2.46% 상승하는데 그칠 것으로 확인되었다. 이는 온실가스 저감이 극한 강수의 강도,

**Table 5.** Same as Table 4 except for precipitation.

Index	Present (1995~2014 years)	Early future (2021~2040 years)		Mid future (2041~2060 years)		Late future (2081~2100 years)	
		SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
RX1day (mm)	137.98	152.28* (14.30)	151.20* (13.22)	155.02** (17.04)	170.04*** (32.06)	160.16*** (22.18)	184.54*** (46.56)
RX5day (mm)	232.63	258.07 (25.44)	249.24 (16.61)	255.38 (22.75)	274.64*** (42.01)	265.42** (32.79)	290.20*** (57.57)
R80mm (days)	2.04	2.25 (0.21)	2.18 (0.14)	2.30 (0.26)	2.33* (0.29)	2.35 (0.31)	2.88*** (0.84)
R150mm (days)	0.48	0.59 (0.11)	0.57 (0.09)	0.60 (0.12)	0.69*** (0.21)	0.64** (0.16)	0.87*** (0.39)
R95p (days)	3.97	4.30 (0.33)	4.16 (0.19)	4.39 (0.42)	4.45* (0.48)	4.49 (0.52)	5.33*** (1.36)
R99p (days)	0.83	1.01* (0.18)	0.98 (0.15)	0.98 (0.15)	1.10*** (0.27)	1.03* (0.20)	1.31*** (0.48)
CWD (days)	8.82	9.44 (0.62)	9.24 (0.42)	10.10** (1.28)	10.19*** (1.37)	9.69** (0.87)	10.20*** (1.39)
CDD (days)	31.68	35.29** (3.61)	34.28* (2.60)	33.64 (1.96)	33.40 (1.72)	32.46 (0.78)	35.52*** (3.84)

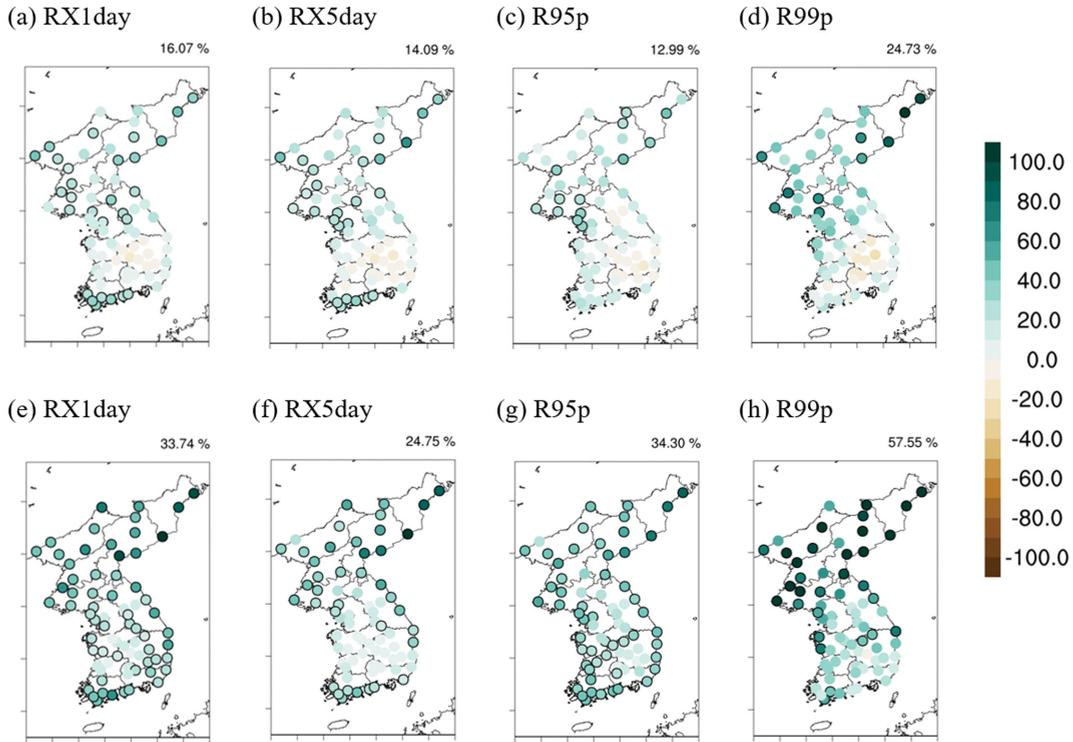


Fig. 6. Same as Fig. 4 except for extreme precipitation indices of RX1day, RX5day, R95p and R99p.

빈도 및 연속일 지수의 변화를 억제하는데 효과가 있을 것임을 시사한다. 마지막으로, 시나리오에 따른 반응의 차이는 극한 강수에 대해서도 미래 후반기에 가장 크게 나타날 것으로 확인되었다. 또한, 반응의 통계적 유의성은 미래 후반기 및 고농도 온실가스 조건에서 더 크게 나타났으며, 특히 미래 후반기 고농도 온실가스 조건에서는 모든 극한 강수 요소가 99% 수준에서 유의하게 변화할 것으로 전망되었다(Table 5).

극한 강수 반응의 공간 특성을 확인하기 위한 극한 강수 지수의 편차 공간 분포가 Figs. 6, 7에 제시되어 있다. 공간 분포는 미래 후반기의 SSP5 및 SSP1 시나리오에 대해서 나타나 있으며, 극한 강수 강도 및 지점별 퍼센타일을 이용하여 산출된 극한 강수 빈도(RX1day, RX5day, R95p, R99p; Fig. 6) 및 극한 강수 연속일(CWD, CDD; Fig. 7) 지수에 대하여 제시되었다. 가장 먼저, 극한 강수 강도 지수는 미래 후반기 SSP5 시나리오 하에서 한반도 중부 및 남부 내륙 지역을 제외한 지역에서 유의한 증가가 나타날 것으로 확인되었다(Figs. 6e, f). 이 때, 극한 강수 강도 지수의 반응은 지역에 따라 다르게 나타날 것으로 전망되었다. 즉, 한반도 북부 지역에서 더 큰 극한 강수 강도 지수의 상승이 전망되며, 특히 북부 동해안 지역

에서는 100% 이상의 상승이 나타날 것으로 확인되었다.

다음으로, 지점별 퍼센타일을 이용하여 산출된 극한 강수 빈도 지수도 미래 후반기 SSP5 시나리오 하에서 한반도 중부 및 남부 내륙을 제외하고 유의한 증가가 나타날 것으로 확인되었다(Figs. 6g, h). 이 때, 극한 강수 빈도 지수의 반응은 지역에 따라 다르게 나타날 것으로 전망되었다. 즉, 한반도 북부 지역을 중심으로 큰 증가가 나타날 것으로 나타났으며, 특히 연중 강수량 99 퍼센타일 초과 일수는 해당 지역에서 100% 이상 증가할 것으로 확인되었다.

마지막으로, 극한 강수 연속일 지수의 변화는 극한 강수 강도 및 빈도 지수와는 다른 공간적 분포가 전망되었다(Fig. 7). 즉, 미래 후반기 SSP5 시나리오 하에서 연중 최대 연속 습윤 일수는 한반도 동쪽 지역을 중심으로 유의한 증가가 전망되며, 증가 규모는 해당 지역 전역에서 비슷할 것으로 확인되었다. 동일 환경 하에서의 연중 최대 연속 건조 일수는 한반도 중부 및 남부 지역을 중심으로 유의한 증가가 전망되며, 이 또한 증가 규모의 지역 편차는 크지 않을 것으로 확인되었다. 이러한 연중 최대 연속 습윤 일수와 건조 일수의 동시 증가는 극한 강수의 양극화로 해석할 수 있다. 즉, 고농도 온실가스 시나리오 하에서는 한

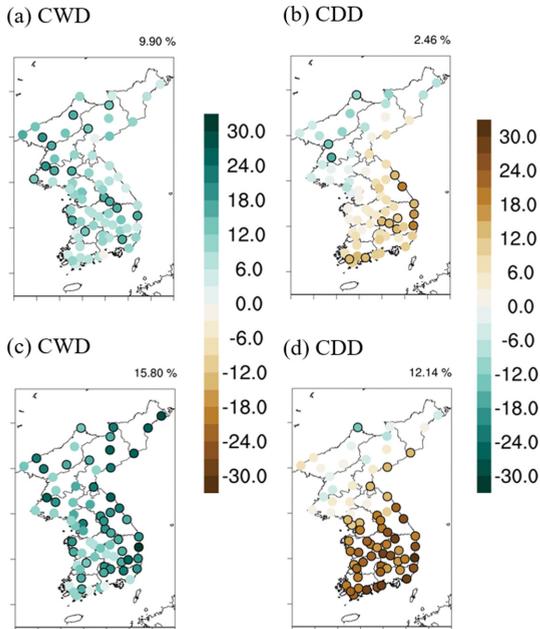


Fig. 7. Same as Fig. 4 except for extreme precipitation indices of CWD and CDD.

반도 중부 및 남부 지역의 우기와 건기가 현재기간에 비해 더 뚜렷해질 것임을 의미한다.

한편, 미래 후반기 SSP1 시나리오 하에서는 극한 강수 강도, 빈도 및 연속일 지수 모두 유의한 변화가 전망되는 지역 및 증가 규모가 크게 감소할 것으로 전망되었다(Figs. 6a-d, 7a, b). 이와 함께, SSP5 시나리오에서 나타난 극한 강수의 강도 지수(Figs. 6a, b), 연중 강수량 95 퍼센타일 초과 일수(Fig. 6c) 및 연속일 지수(Figs. 7a, b) 전망의 지역 편차도 SSP1 시나리오 하에서는 줄어들 것으로 확인되었다. 하지만, 연중 강수량 99 퍼센타일 초과 일수(Fig. 6d)에 대해서는 SSP1 시나리오 조건임에도 불구하고, 일부 한반도 북부 지역에서 100%에 가까운 큰 상승이 전망되었다. 이는 해당 지역의 극한 강수 반응 억제에 온실 가스 저감의 효과가 약할 수 있음을 시사한다.

### 3.3.3 온난화와 강수의 관계성

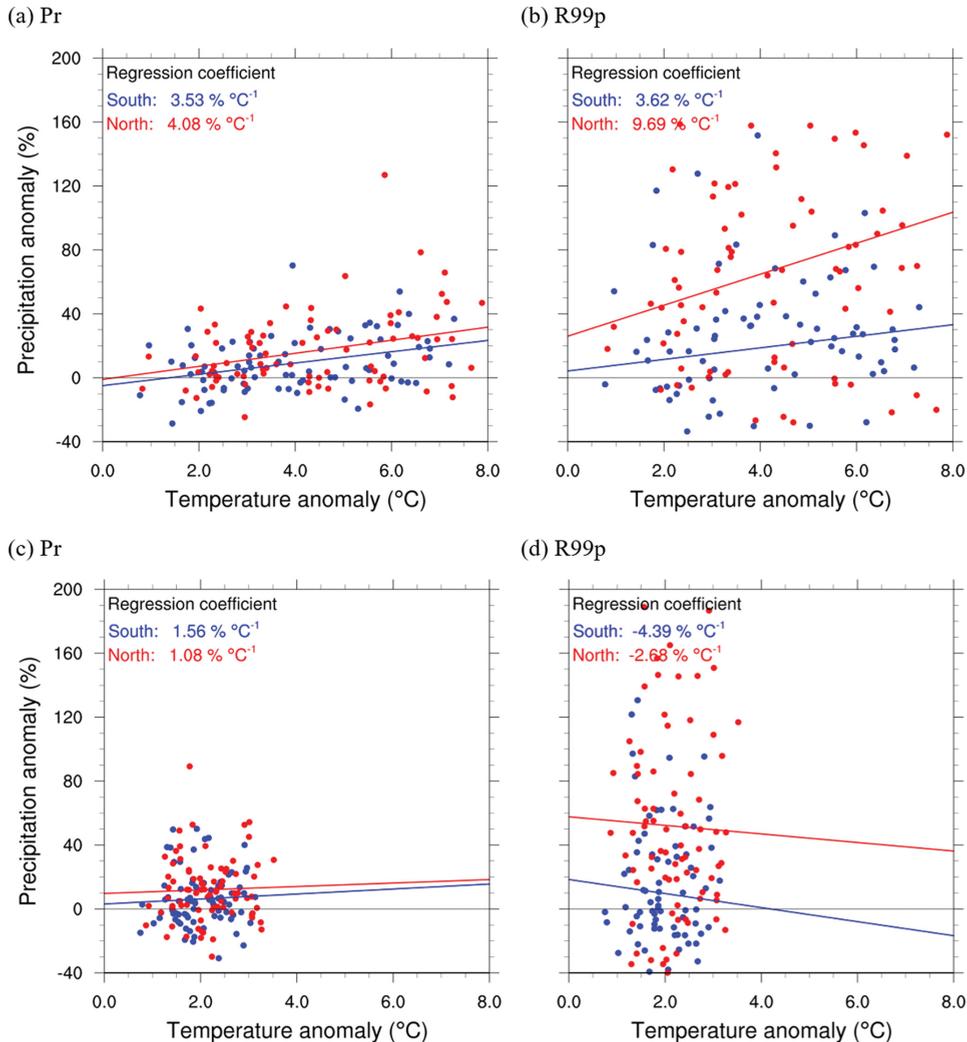
본 절에서는 고농도 온실가스 시나리오 하에서 한반도 강수가 강화되는 측면에 대해 논의하려고 한다. Kharin et al. (2013)은 29개의 CMIP5 모델 MME를 이용하여 전 지구 지역의 평균 및 극한 기후를 전망하였으며, 평균 강수량이 기온 상승에 대하여  $1.8\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 의 관계를 가지고, GEV (Generalized Extreme value) 분포 하에서의 연 강수량 20년 재현 수준(return value)은 기온 상승에 대하여  $5.8\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 의 관계를 가

질 것임을 확인하였다. 또한 Lee et al. (2018)은 HAPPI (Half a degree Additional warming, Prognosis and Projected Impacts) 프로젝트 하에서의 5개의 모델(총 925개의 앙상블) 모의 자료를 이용하여 동아시아 지역의 극한 기후를 전망하였으며, 99 퍼센타일 강수량이 기온 상승에 대해  $6.9\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 의 관계를 가질 것임을 확인하였다. 즉, 전세계 및 동아시아 지역에 대하여 극한 강수로 갈수록 온도 상승과의 관계가  $7.0\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 를 가지는 Clausius-Clapeyron 관계에 근접할 것임이 여러 선행연구에서 전망되고 동시에, 이는 온난화로 인한 수증기량의 증가와 해당 지역의 강수 간의 관계를 의미한다는 점이 언급되었다.

이러한 관계가 한반도의 미래 기후에도 나타나는지 확인해보기 위하여 온난화 정도에 따른 평균 강수(pr) 및 극한 강수의 변화율을 산포도를 이용하여 확인하였다(Fig. 8). 이 때, 극한 강수의 변화를 나타내기 위해 극한 강수 빈도 지수인 연중 강수량 99 퍼센타일 초과 일수(R99p)를 사용하였다. 또한 앞선 강수 전망에서 남북 지역 편차가 나타났으므로, 남한 ASOS 지점에 대해서는 남부 지역, 북한 ASOS 지점에 대해서는 북부 지역으로 설정하여 지역에 따른 차이를 조사하였다. 가장 먼저 고농도 온실가스 하에서 기온 상승에 대한 평균 강수의 변화량을 살펴보면(Fig. 8a), 한반도 남부 지역은  $3.53\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 북부 지역은  $4.08\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 로 북부 지역의 강수 변화가 더 클 것으로 전망되었다. 이는 온난화로 인한 수증기량의 증가가 한반도 평균 강수 증가에 기여하고 북부 지역에서 더 민감하게 나타날 것임을 시사한다.

다음으로 극한 강수의 변화량을 살펴보면(Fig. 8b), 기온 상승에 따른 극한 강수의 연 변동성이  $-40\%$ 에서  $160\%$ 로 매우 크게 나타날 것으로 전망되었다. 이에 따라 기온과 극한 강수 간의 관계성의 유의성이 남부 및 북부 지역 모두 떨어질 것으로 확인되었다. 즉, 한반도 지역에 대해서는 선행연구에서 나타났던 온난화와의 관계가 극한 강수에서는 뚜렷하지 않고 평균 강수에 대해서만 나타날 것으로 전망되었다. 이러한 차이점은 좁은 한반도의 공간 규모와 함께, 여름철 몬순과 태풍 등 변동성이 크고 복잡한 한반도 강수 메커니즘에 기인한 것으로 보이며(Jin et al., 2016; Park and Min, 2019), 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

한편, 온난화 정도에 따른 한반도 강수의 변화 관계를 저농도 온실가스 시나리오 하에서도 살펴보았다. 평균 강수에 대하여(Fig. 8c), 기온 상승에 따른 관계가 한반도 남부 및 북부 두 지역 모두  $1.56\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  및  $1.08\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 로 뚜렷하지 않을 것으로 전망되었다. 이와 함께 극한 강수에 대해서도(Fig. 8d), 기온 상승과의 관계는 극한 강수의 높은 연 변동성으로 인하여



**Fig. 8.** Scatter plots between spatially averaged annual anomalies of temperature (x-axis) and precipitation (y-axis) under SSP5 (upper panel) and SSP1 (lower panel) scenario during period of 2021~2100 years over southern (blue) and northern (red) region of the Korean Peninsula. The precipitations are for mean precipitation (left panel) and extreme indices of R99p (right panel), respectively. The anomalies are based on Historical experiment of present. Linear regression coefficient for the anomalies is indicated on upper left of each plot.

그 관계가 뚜렷하지 않을 것으로 확인되었다. 이는 3.3.2항에서 전망되었던 한반도 북부의 극한 강수 빈도 지수(R99p)에 대한 온실가스 저감의 약한 효과는 온난화가 아닌 위에서 언급된 한반도 강수 메커니즘에 의한 영향일 수 있음을 시사한다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 CORDEX-EA Phase 2 프로젝트 하에서 산출된 5종의 RCM 모의 자료를 이용하여 한반

도의 미래 기후를 전망하였다. 이 때, 온실가스 배출 정도에 따른 차이를 확인하기 위하여 CMIP6의 고농도 온실가스 시나리오(SSP5) 및 저농도 온실가스 시나리오(SSP1)를 이용하였다. 연구의 신뢰성 제고를 위하여 기온에 대해서는 Variance Scaling, 강수에 대해서는 Power Transformation 보정 기법을 이용하여 한반도 72개 ASOS 지점 관측 자료를 기준으로 편차 보정을 실시하였다. 편차 보정을 통하여 기온, 강수의 시간 및 공간 분포에 대한 편차를 해소하였으며, 동일한 보정 계수를 미래 시나리오 모의자료에도 적용

하였다.

한반도 극한 기후를 전망하기 전, 확률밀도함수 분석을 이용하여 평균 기후의 변화를 살펴보았다. 미래 후반기 SSP5 시나리오 하에서 평균 기온의 분포는 현재 기간에 비해 평균이 6.38°C로 크게 증가할 것으로 전망되었다. 이와 함께, 분포의 표준편차도 크게 증가할 것으로 확인되었다. 이에 따라 해당 환경에서 현재 기간에 나타났던 기온 빈도는 크게 감소하고, 양의 극한 기온 빈도가 크게 증가할 것으로 전망되었다. 평균 강수에 대해서도, 현재 기간에 비해 분포의 평균이 20.56% 증가할 것으로 확인되었으며, 표준편차도 함께 증가하여 극한 강수의 빈도가 증가할 것으로 전망되었다. 한편, 미래 후반기 SSP1 시나리오 하에서는 평균 기후의 분포 변화가 작을 것으로 전망되어 온실가스 저감이 평균 기후의 변화 억제에 효과가 있을 것임을 확인하였다.

다음으로, 극한기후지수를 이용하여 극한 기후의 변화를 정량화하고 변화의 공간 특성을 살펴보았다. 가장 먼저 극한 기온 강도에 대하여, 미래 후반기 SSP5 시나리오 하에서 극한 기온 강도 지수(TNn, TXn, TNx, TXx)는 6.41~8.18°C로 평균 기온 보다 더 큰 상승이 전망되었다. 이 때, TNn과 TNx는 한반도 북부, TXx는 남부 내륙을 중심으로 더 크게 상승하여 극한 기온 강도 지수 반응의 지역 편차가 확인되었다. 또한 타 극한 기온 강도에 비해 TNx의 상승이 6.41°C로 비교적 작게 전망되었다. 한편, 특정 임계 값을 이용한 극한 기온 빈도 지수(FD, ID, TR, HW) 및 지점별 퍼센타일을 이용한 극한 기온 빈도 지수(TN10p, TX10p, TN90p, TX90p)에 대하여, SSP5 시나리오에서 한랭 관련 일수는 크게 감소하고 온난 관련 일수는 크게 증가할 것으로 전망되었다. 이에 반해, SSP1 시나리오에서는 이러한 극한 기온의 반응이 SSP5 시나리오에 비해 감소하여 온실가스 저감이 극한 기온에도 효과가 있을 것임을 확인하였다. 하지만, 극한 저온 빈도(TN10p, TX10p)에 대해서는 온실가스 저감 효과가 타 지역에 비해 해안 지역에서 약하게 나타날 것으로 전망되었다.

극한 강수에 대하여, 미래 후반기 SSP5 시나리오 하에서 극한 강수 강도 지수(RX1day, RX5day)는 각각 33.74%, 24.75%로 평균 강수에 비해 더 큰 상승이 전망되었다. 극한 강수 강도 지수는 한반도 북부 지역을 중심으로 큰 상승이 나타날 것으로 확인 되었으며, 특히 북부 동해안 지역에서는 100% 이상의 매우 큰 상승이 전망되었다. 극한 강수 강도뿐만 아니라 빈도 지수(R95p, R99p)도 한반도 북부 지방을 중심으로 큰 상승이 전망되었다. 한편, 온난화 환경은 극한 강수 연속일 지수(CWD, CDD)도 상승시킬 것으로 전망되었다. 한편, SSP1 시나리오에서는 모든 극

한 강수의 반응이 억제되어 온실 가스 저감이 극한 강수에도 효과가 있을 것으로 전망되었다. 하지만, 연중 강수량 99퍼센타일 강수 초과 일수(R99p)에 대해서는 온실가스 저감 효과가 타 지역에 비해 한반도 북부 일부 지역에서 약하게 나타날 것으로 확인되었다.

온난화 환경 하에서 강수가 강화되는 원인을 살펴보기 위하여, 온난화에 따른 강수량의 변화 정도를 확인하였다. 가장 먼저 평균 강수에 대하여, SSP5 시나리오 하에서 기온 상승에 대한 평균 강수의 변화율은 한반도 남부 지역은 3.53% °C<sup>-1</sup>, 북부 지역은 4.08% °C<sup>-1</sup>로 전망되었다. 하지만 동일 조건에서 극한 강수(R99p)에 대해서는 극한 강수의 큰 연 변동성에 의해 온난화와 극한 강수 간에 관계가 뚜렷하지 않을 것으로 전망되었다. 즉, 선행 연구에서 나타났던 온난화-강수와의 관계가 한반도 지역에 대해서는 평균 강수에 대해서만 나타날 것으로 확인되었다. 이는 한반도의 극한 강수 강화가 온난화뿐만 아니라 여름철 몬순, 태풍 등 변동성이 크고 복잡한 한반도의 강수 메커니즘에 영향을 받을 것임을 시사한다.

본 연구를 종합하면 다음과 같다. 고농도 온실가스 환경 하에서, 평균 및 극한 측면의 한반도 기온은 크게 상승하고 강수도 큰 변동성을 가지며 증가할 것으로 전망되었다. 따라서 현재 추세대로 온실가스가 배출될 경우 심각한 기후변화가 나타날 것임이 최신 지역기후모델 및 시나리오 하에서도 확인되었다. 저농도 온실가스 환경 하에서는 고농도 온실가스 환경에 비해 기온 및 강수 모두 그 증가가 둔화되었지만, 일부 극한 기온 빈도(TN10p, TX10p) 및 강수 빈도(R99p) 지수에 대해서는 온실가스 저감 효과가 지역적인 편차를 보일 것으로 전망되었다. 한편, 한반도 강수량의 증가 전망과 관련하여, 온난화와 평균 강수 간의 관계는 뚜렷했으나, 극한 강수와의 관계는 뚜렷하지 않았다. 따라서, 효과적인 탄소 중립 추진 및 기후 변화 대응을 위해서는 온실가스 배출에 따른 정확한 기후 예측과 더불어 그 과정을 이해하려는 노력이 지속적으로 필요할 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「AR6 기후변화시나리오 개발·평가」(KMA2018-00321)의 지원을 통해 수행되었습니다.

## REFERENCES

Ahn, J.-B., and Coauthors, 2016: Changes of precipitation

- extremes over South Korea projected by the 5 RCMs under RCP scenarios. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 223-236, doi:10.1007/s13143-016-0021-0.
- Casanueva, A., and Coauthors, 2016: Daily precipitation statistics in a EURO-CORDEX RCM ensemble: Added value of raw and bias-corrected high-resolution simulations. *Climate Dyn.*, **47**, 719-737, doi:10.1007/s00382-015-2865-x.
- Chen, J., F. P. Brissette, and R. Leconte, 2011: Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *J. Hydrol.*, **401**, 190-202, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.02.020.
- Davies, T., M. J. P. Cullen, A. J. Malcolm, M. H. Mawson, A. Staniforth, A. A. White, and N. Wood, 2005: A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 1759-1782, doi:10.1256/qj.04.101.
- Donat, M. G., L. V. Alexander, H. Yang, I. Durre, R. Vose, and J. Caesar, 2013: Global land-based datasets for monitoring climatic extremes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 997-1006, doi:10.1175/BAMS-D-12-00109.1.
- Eyring, V., S. Bony, G. A. Meehl, C. A. Senior, B. Stevens, R. J. Stouffer, and K. E. Taylor, 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, **9**, 1937-1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.
- Giorgi, F., 2019: Thirty years of regional climate modeling: where are we and where are we going next?. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 5696-5723, doi:10.1029/2018JD030094.
- \_\_\_\_\_, and W. J. Gutowski, 2015: Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annu. Rev. Env. Resour.*, **40**, 467-490, doi:10.1146/annurev-environ-102014-021217.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2012: RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Res.*, **52**, 7-29, doi:10.3354/cr01018.
- Hong, S.-Y., and Coauthors, 2013: The Global/Regional Integrated Model system (GRIMs). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 219-243, doi:10.1007/s13143-013-0023-0.
- Im, E.-S., Y.-W. Choi, and J.-B. Ahn, 2017: Worsening of heat stress due to global warming in South Korea based on Multi-RCM ensemble projections. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 11444-11461, doi:10.1002/2017JD026731.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2021: Emergence of robust anthropogenic increase of heat stress-related variables projected from CORDEX-CORE climate simulations. *Climate Dyn.*, **57**, 1629-1644, doi:10.1007/s00382-020-05398-w.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte et al. Eds., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 39 pp, In press.
- Jin, C.-S., D.-H. Cha, D.-K. Lee, M.-S. Suh, S.-Y. Hong, H.-S. Kang, and C.-H. Ho, 2016: Evaluation of climatological tropical cyclone activity over the western North Pacific in the CORDEX-East Asia multi-RCM simulations. *Climate Dyn.*, **47**, 765-778, doi:10.1007/s00382-015-2869-6.
- Kharin, V. V., F. W. Zwiers, X. Zhang, and M. Wehner, 2013: Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, **119**, 345-357, doi:10.1007/s10584-013-0705-8.
- Kim, G., and Coauthors, 2018a: Future changes in extreme precipitation indices over Korea. *Int. J. Climatol.*, **38**, e862-e874, doi:10.1002/joc.5414.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2020a: Projection of future precipitation change over South Korea by regional climate models and bias correction methods. *Theor. Appl. Climatol.*, **141**, 1415-1429, doi:10.1007/s00704-020-03282-5.
- Kim, J., and Coauthors, 2018b: Winter precipitation characteristics in western US related to atmospheric river landfalls: Observations and model evaluations. *Climate Dyn.*, **50**, 231-248, doi:10.1007/s00382-017-3601-5.
- Kim, J.-U., T.-J. Kim, D.-H. Kim, D.-H. Cha, S.-K. Min, and Y.-H. Kim, 2020b: Evaluation of performance and uncertainty for Multi-RCM over CORDEX-East Asia phase 2 region. *Atmosphere*, **30**, 361-376. doi:10.14191/Atmos.2020.30.4.361 (in Korean with English abstract).
- KMA, 2021: An analysis report for climate change over the Republic of Korea during 109 years (1912~2020 years). Korea Meteorological Administration, 68 pp [Available online at <http://www.climate.go.kr/home/bbs/view.php?code=71&bname=scenario&vcode=6511&cpage=1&vNum=Notice&skind=&sword=&category1=&category2=>] (in Korean).
- Leander, R., T. A. Buishand, B. J. J. M. van den Hurk, and M. J. M. de Wit, 2008: Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. *J. Hydrol.*, **351**, 331-343, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.12.020.
- Lee, D., S.-K. Min, E. Fischer, H. Shioyama, I. Bethke, L.

- Lierhammer, and J. F. Scinocca, 2018: Impacts of half a degree additional warming on the Asian summer monsoon rainfall characteristics. *Environ. Res. Lett.*, **13**, 044033, doi:10.1088/1748-9326/aab55d.
- Lee, M., D.-H. Cha, M.-S. Suh, E.-C. Chang, J.-B. Ahn, S.-K. Min, and Y.-H. Byun, 2020: Comparison of tropical cyclone activities over the Western North Pacific in CORDEX-East Asia phase I and II experiments. *J. Climate*, **33**, 10593-10607, doi:10.1175/JCLI-D-19-1014.1.
- Oh, S.-G., and Coauthors, 2016: Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. Part 2: precipitation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 171-189, doi:10.1007/s13143-016-0018-8.
- Orlowsky, B., and S. I. Seneviratne, 2012: Global changes in extreme events: Regional and seasonal dimension. *Climatic Change*, **110**, 669-696, doi:10.1007/s10584-011-0122-9.
- Park, C., and S.-K. Min, 2019: Multi-RCM near-term projections of summer climate extremes over East Asia. *Climate Dyn.*, **52**, 4937-4952, doi:10.1007/s00382-018-4425-7.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2016: Evaluation of multiple regional climate models for summer climate extremes over East Asia. *Climate Dyn.*, **46**, 2469-2486, doi:10.1007/s00382-015-2713-z.
- Powers, J. G., and Coauthors, 2017: The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 1717-1737, doi:10.1175/BAMS-D-15-00308.1.
- Riahi, K., and Coauthors, 2017: The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environ. Change*, **42**, 153-168, doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
- Rockel, B., A. Will, and A. Hense, 2008: The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorol. Z.*, **17**, 347-348, doi:10.1127/0941-2948/2008/0309.
- Sellar, A. A., and Coauthors, 2019: UKESM1: Description and evaluation of the U.K. earth system model. *J. Adv. Model. Earth Sys.*, **11**, 4513-4558, doi:10.1029/2019MS001739.
- Sillmann, J., V. V. Kharin, X. Zhang, F. W. Zwiers, and D. Bronaugh, 2013: Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 1716-1733, doi:10.1002/jgrd.50203.
- Suh, M.-S., and Coauthors, 2016: Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. Part 1: Surface air temperature. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 151-169, doi:10.1007/s13143-016-0017-9.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485-498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Teutschbein, C., and J. Seibert, 2012: Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *J. Hydrol.*, **456-457**, 12-29, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.
- WMO, 2019: *The Global Climate in 2015-2019*. World Meteorological Organization, 21 pp [Available online at [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=21522](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21522)].
- Zhang, X., L. Alexander, G. C. Hegerl, P. Jones, A. K. Tank, T. C. Peterson, B. Trewin, and F. W. Zwiers, 2011: Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*, **2**, 851-870, doi:10.1002/wcc.147.

## Appendix

### 기온과 강수 자료에 적용된 편차 보정 기법

기온에 대하여 VS 기법을 적용하기 위한 선행 작업으로 Linear Scaling(LS) 보정을 실시하여야 한다. LS 기법은 모의 자료의 월 기후 값을 관측자료의 월 기후 값과 동일하게 하는 보정 계수( $\mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{contr}(d))$ )를 이용한다. 이 때, 해당 보정 계수는 시간에 따라 변동하지 않다고 가정하여 미래 시나리오 하에서의 모의자료에도 동일한 보정 계수가 사용된다(Deutschbein and Seibert, 2012). 따라서,

$$T_{contr}^{*1}(d) = T_{contr}(d) + \mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{contr}(d)) \quad (A1)$$

$$T_{scen}^{*1}(d) = T_{scen}(d) + \mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{contr}(d)) \quad (A2)$$

평균에 대한 편차만을 보정해주는 LS 기법에 비해, VS 기법은 분산에 대한 편차에 대해서도 보정을 가능케 한다. 가장 먼저, LS 보정이 적용된 모의 자료의 월 기후 값을 0으로 만들어 준다. 즉,

$$T_{contr}^{*2}(d) = T_{contr}^{*1}(d) - \mu_m(T_{contr}^{*1}(d)) \quad (A3)$$

$$T_{scen}^{*2}(d) = T_{scen}^{*1}(d) - \mu_m(T_{scen}^{*1}(d)) \quad (A4)$$

그 다음, 월 기후 값이 0인 모의 자료의 표준편차를 관측 자료의 표준편차를 이용하여 보정을 진행한다. 이는 다음과 같다.

$$T_{contr}^{*3}(d) = T_{contr}^{*2}(d) * \left[ \frac{\sigma_m(T_{obs}(d))}{\sigma_m(T_{contr}^{*2}(d))} \right] \quad (A5)$$

$$T_{scen}^{*3}(d) = T_{scen}^{*2}(d) * \left[ \frac{\sigma_m(T_{obs}(d))}{\sigma_m(T_{scen}^{*2}(d))} \right] \quad (A6)$$

마지막으로, 표준편차가 보정된 모의 자료의 월 기후값을 방정식 A3와 A4에서 사용되었던 계수( $\mu_m(T_{contr}^{*1}(d))$ ,  $\mu_m(T_{scen}^{*1}(d))$ )를 이용하여 조정한다. 즉,

$$T_{contr}^*(d) = T_{contr}^{*3}(d) + \mu_m(T_{contr}^{*1}(d)) \quad (A7)$$

$$T_{scen}^*(d) = T_{scen}^{*3}(d) + \mu_m(T_{scen}^{*1}(d)) \quad (A8)$$

강수에 대해서 적용된 PT 기법은 비선형적인  $a$  +  $P^{b_m}$ 의 멱함수를 이용하여 분포의 평균 및 분산을 보정한다. 이 때, 월마다 산출되는 지수인  $b_m$ 에 대해서는 90일 이동 값(window)을 이용하여 산출된 월별 변동 계수(coefficient of variation)를 이용한다. 변동

계수는 관측 값과 모의자료의 멱함수를 동일하게 하는 값이며, 각 변수의 월 표준편차를 월 기후 값으로 나눈 값과 동일하다. 이를 결정하는 변수인 지수  $b_m$ 은 이분법(bisection) 알고리즘을 이용하여 산출하였다. 즉,

$$\begin{aligned} \text{Find } b_m \\ f(b_m) = 0 = CV_m(P_{obs}(d)) - CV_m(P_{contr}^{b_m}(d)) \\ = \frac{\sigma_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{obs}(d))} - \frac{\sigma_m(P_{contr}^{b_m}(d))}{\mu_m(P_{contr}^{b_m}(d))} \end{aligned} \quad (A9)$$

이분법으로 확인된  $b_m$ 을 이용하여 다음과 같이 편차 보정을 진행한다.

$$P_{contr}^{*1}(d) = P_{contr}^{b_m}(d) \quad (A10)$$

$$P_{scen}^{*1}(d) = P_{scen}^{b_m}(d) \quad (A11)$$

이후 LS 기법을 이용하여 월 기후 값을 관측자료의 월 기후 값과 동일하게 해준다. 즉,

$$P_{contr}^*(d) = P_{contr}^{*1}(d) * \left[ \frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{contr}^{*1}(d))} \right] \quad (A12)$$

$$P_{scen}^*(d) = P_{scen}^{*1}(d) * \left[ \frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{contr}^{*1}(d))} \right] \quad (A13)$$

**Table A1.** Definitions of symbols, subscripts and superscripts for equations in Appendix.

Symbols	Definition
$T$	Temperature
$\mu$	Average
$d$	Daily
$a, b$	Parameter
$CV$	Coefficient of variance
$P$	Precipitation
$\sigma$	Standard deviation
Subscripts/Superscripts	
* 1, 2 or 3	Steps for bias correction
*	Bias corrected
$m$	Monthly
$contr$	Historical experiment
$obs$	Observation
$scen$	Scenario simulation